

Д.В. Ромашов, Д.О. Федоренко,  
В.А.Федорович, д-р техн. наук, Харьков Украина

## **ОСНОВЫ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ШЛИФОВАНИЯ**

*Шліфування є найбільш поширеним високопродуктивним способом прецизійної обробки деталей машин. Вивчається процес високошвидкісного шліфування, застосування якого особливо актуально для обробки надтвердих матеріалів. Розглянуті основні проблеми, що виникають при надшвидкісному шліфуванні, а також розглянуті перспективи їх вирішення з використанням методів математичного моделювання.*

*Шлифование является наиболее распространенным высокопроизводительным способом прецизионной обработки деталей машин. Изучается процесс высокоскоростного шлифования, применение которого особенно актуально для обработки сверхтвердых материалов. Рассмотрены основные проблемы, возникающие при высокоскоростном шлифовании, а также перспективы их решения с использованием методов математического моделирования.*

*Grinding is the most common way to high-precision machining of machine parts. We study the process of high-speed grinding, the use of which is especially important for the processing of super hard materials. This article describes the main problems associated with high-speed grinding, as well as the prospects for their solution, using mathematical modeling methods.*

### **Введение**

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности операций шлифования и расширения его технологических возможностей является изменение скорости резания, задаваемой частотой вращения круга, т.е. применение процесса высокоскоростного шлифования.

При повышении скорости шлифования свыше 80 м/с уменьшается толщина среза материала каждым абразивным зерном, изменяются условия стружкообразования и других параметров процесса абразивной обработки [4]. Высокоскоростное шлифование повышает производительность, точность и качество обработанной поверхности [2-5]. В связи с этим повышение скорости резания считается одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности операций шлифования и расширения его технологических возможностей.

Большое внимание уделяется выбору параметров связующего компонента для обеспечения работы круга на высоких скоростях. Выбор подходящего связующего компонента не является простым и тут может доминировать традиционный подход. Однако, в современных условиях необходимо внедрение новых связующих компонентов, а так же системы их выбора для конкретных условий обработки.

Результаты фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований в области абразивной обработки, выполненных отечественными и зарубежными учеными, наглядно демонстрируют, что эффективность процесса шлифования напрямую зависит от скорости резания. В то же время практика показала, что при высокоскоростном шлифовании значительно повышается контактная температура шлифования, увеличиваются интенсивность вибраций и центробежные силы, приложенные к вращающемуся кругу, а высокая скорость воздушного потока вокруг круга, препятствует проникновению охлаждающей жидкости в зону резания [5].

Основными факторами, сдерживающими массовое внедрение высокоскоростного алмазного шлифования, являются стоимость инструмента, недостаточное понимание физики процесса, а также то, что высокоскоростные режимы обработки требуют подходящего оборудования, с соответствующими шпинделями, шлифовальным инструментом, подсистемами и жесткостями [5].

Решающим фактором в повышении эффективности работы алмазно-абразивных инструментов является, на наш взгляд, применение научно обоснованных режимов резания и рациональный подбор компонентов круга, позволяющих также существенно увеличить период стойкости шлифовальных кругов.

Как свидетельствует международный опыт, моделирование процессов обработки является действенным инструментом для исследования факторов, определяющих эффективность шлифования и оптимизации процесса [2-5].

Исходя из изложенного, целью настоящей работы является 3D моделирование процесса шлифования, в результате которого можно прогнозировать поведение инструмента в заданных условиях и определить критерии для обоснованного выбора материалов и конструкций при создании эффективно абразивного инструмента [2-6].

### **Результаты и их обсуждение**

При выполнении работы были использованы современные методы проведения модельных экспериментов. В основе комплекса расчетов и прогнозирования эксплуатационных характеристик использовался метод конечных элементов (МКЭ). В работе применялись новейшие аналитические CAD/CAE- комплексы, такие как: ANSYS, CosmosWorks, SolidWorks. Для получения математической модели процессов изготовления и эксплуатации кругов для высокоскоростного шлифования использован метод многофакторного эксперимента.

Общий вид математической модели:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ij} X_i X_j + \sum b_{ii} X_i^2 + \dots \quad (1)$$

В модели присутствуют: X (независимые переменные, факторы) - режимы деформации, термической обработки, режимы резания; Y - (зависимые

переменные, отклики, параметры оптимизации, функции цели); коэффициенты  $b_i$  находятся расчетным путем. Существенным является то обстоятельство, что каждому набору уровней входов соответствуют определенные значения выходов.

Для серии опытов по изготовлению кругов для высокоскоростного шлифования были приняты такие влияющие факторы: коэффициент температурного расширения металлофазы ( $0,5e-05$  -  $1,7e-05$  1/K), модуль упругости покрытия зерна ( $1,01e+011$  -  $9e+011$  Н/м<sup>2</sup>), модуль упругости связки ( $1,9e+011$  -  $6,9e+011$  Н/м<sup>2</sup>) и температура спекания ( $400$  –  $800$  °C).

Используя выбранные исходные данные, проведена серия модельных экспериментов по спеканию алмазонасного слоя. Получены все возможные картины распределения полей напряжений и деформаций в зоне спекания от выбранных факторов

Исходя из этого, выявлена математическая модель, описывающая процесс изготовления кругов для высокоскоростного шлифования в выбранном диапазоне факторов:

$$Y = 23.12 + 0.04X_1 - 0.17X_2 + 3.66X_3 + 0X_4 - 0.001X_1X_2 + 0.006X_1X_3 + 0X_1X_4 - 0.03X_2X_3 + 0X_2X_4 + 0X_3X_4 + 1.28X_1^2 + 1.50X_2^2 + 1.25X_3^2 - 2.36X_4^2 \quad (2)$$

На рисунке 1 показана зависимость напряжений от модуля упругости связки при различных покрытиях алмазных зерен (для процесса спекания алмазных кругов для высокоскоростного шлифования).

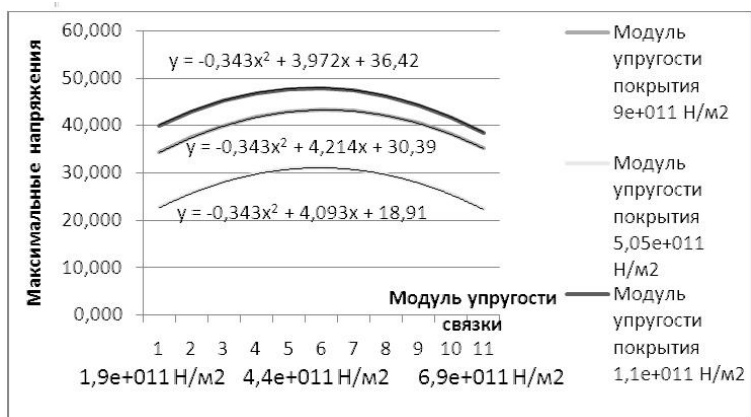


Рисунок 1 – Зависимость напряжений от модуля упругости связки при различных покрытиях алмазных зерен.

При анализе результатов моделирования выявлено, что разрушающие напряжения в значительно меньшей мере зависят от температуры и КТР ме-

таллофазы при определенном сочетании марок покрытий алмазных зерен и марок связующих компонентов круга. Визуализация полей напряжений в зоне спекания (худший вариант) показана на рисунке 2.

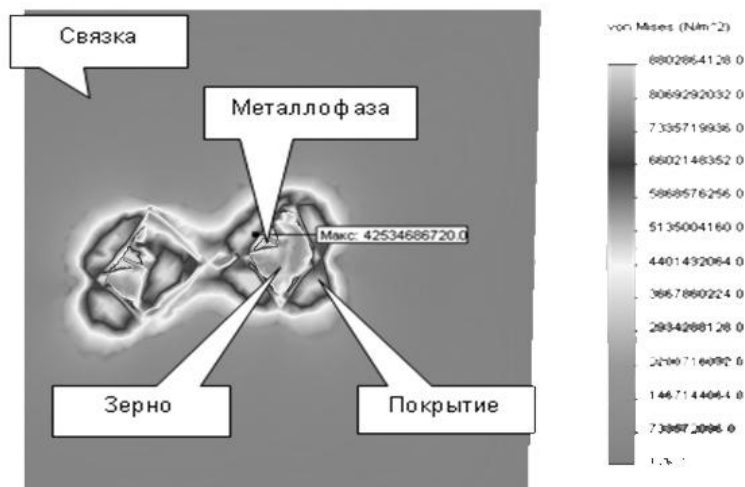


Рисунок 2 – Визуализация полей напряжений худшего варианта из серии опытов по спеканию кругов в заданном диапазоне факторов

Для моделирования процесса высокоскоростного шлифования применялась та же методика проведения многофакторного эксперимента, основанная на зависимости (1).

Для серии опытов по изготовлению кругов для высокоскоростного шлифования были приняты такие влияющие факторы: коэффициент температурного расширения металлофазы ( $0,5e-05$  -  $1,7e-05$  1/K), модуль упругости связки ( $1,9e+011$  -  $6,9e+011$  мН/м<sup>2</sup>), температура ( $400$  –  $800$  °C), скорость обработки ( $90$  –  $200$  м/с).

Для описания процесса обработки была получена математическая модель:

$$Y = 23.12 + 0.04X_1 - 0.17X_2 + 3.66X_3 + 0X_4 - 0.001X_1X_2 + 0.006X_1X_3 + 0X_1X_4 - 0.03X_2X_3 + 0X_2X_4 + 0X_3X_4 + 1.28X_1^2 + 1.50X_2^2 + 1.25X_3^2 - 2.36X_4^2 \quad (3)$$

Рисунок 3 показывает результаты модельных экспериментов по расчету зависимостей напряжений в зоне микрорезания от прочностных свойств связок. При помощи моделирования установлено, что при работе на высоких скоростях связка становится настолько жесткой, что зерна не могут демпфировать при ударе и разрушаются хрупко с образованием острых граней. Дан-

ные результаты особенно актуальны для обработки сверхтвёрдых материалов. Диапазон оптимальных скоростей обработки при этом составляет от 150 до 180 м/с.

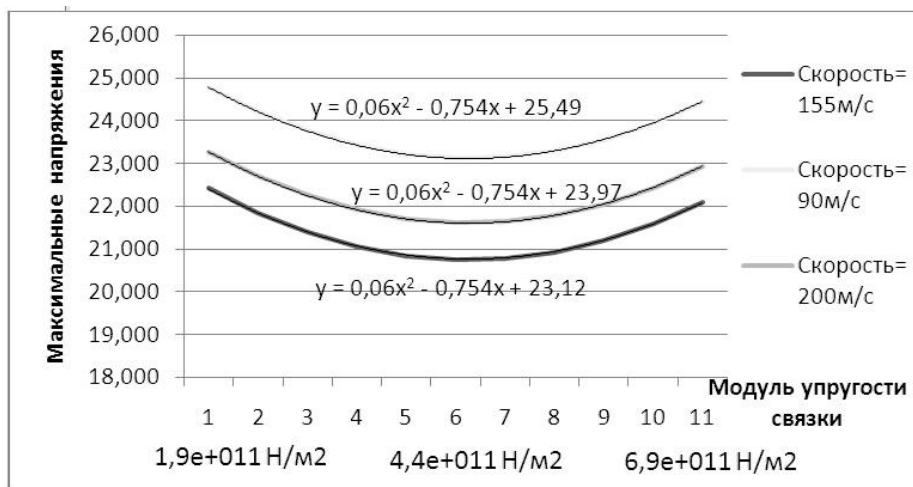


Рисунок 3 – Зависимость напряжений в зоне микрорезания от модуля упругости связки при варьировании скорости резания

На рисунке 4 показана визуализация полей напряжений во фрагменте алмазоносного слоя, зерне и обрабатываемом материале.

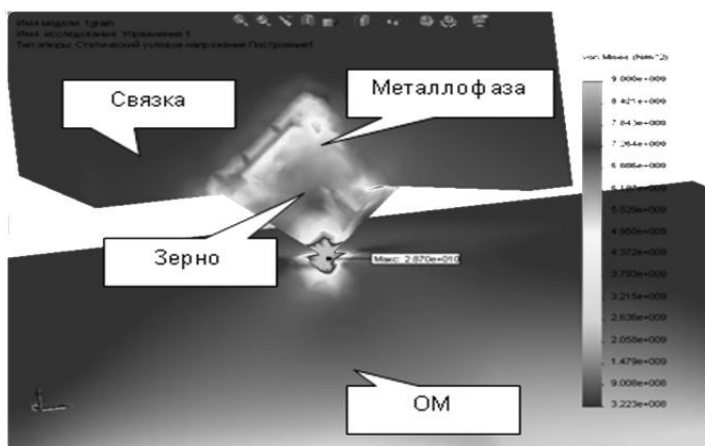


Рисунок 4 – Визуализация полей напряжений в зоне микрорезания при обработке со скоростью 155 м/с

Вокруг зерна виден упрочненный не разрушенный слой связки, а так же поверхность отлома края зерна.

### Выводы

Изучен процесс изготовления кругов на различных связках методом 3D моделирования его напряженно-деформированного состояния для возможности изготовления данного круга для условий сверхскоростного шлифования.

На основе модельных экспериментов и теории математического планирования выявлены модели, описывающие процесс изготовления и применения кругов для высокоскоростного алмазного шлифования с множеством влияющих факторов.

Получены результаты о возможности уменьшения влияния разрушающего температурного фактора при изготовлении кругов за счет использования определенных сочетаний марок связок и покрытий алмазных зерен.

Показан эффект упрочнения связки вокруг заделки алмазного зерна в рабочем диапазоне скоростей от 150 до 180 м/с. При обработке сверхтвердых материалов это способствует образованию субмикроромок на алмазных зернах, что приводит к улучшению качества обрабатываемого СТМ.

**Список использованных источников:** 1 Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Уч. пособие / Под. ред. А.И. Грабченко. - Харьков: ХГПУ, 1999. - 436 с. 2 V. V. Gol'din, V. G. Zhuravskii and P. A. Pravil'shchikov CALS technologies and tolerant translators Automation and Remote Control, Volume 68, Number 4, 710-726 3 M. J. Jackson, C. J. Davis, M. P. Hitchiner, and B. Mills, High-Speed Grinding with c.B.N. Grinding Wheels – Applications and Future Developments, Journal of Materials Processing Technology (2001), 110, 78-88. ISSN 0924-0136. 4 Karpuschewski, B., Wehmeier, M., and Inasaki, I., 2000, Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors, Annals of the CIRP 49/1:235-240. 5 J.F.G. Oliveira, E.J. Silva, C. Guo, F. Hashimoto (2009) Industrial challenges in grinding. Annals of the CIRP 58 663–680 6 M. J. Jackson, N. Barlow, and K. K. B. Hon, Computer Aided Design of High-Performance Grinding Tools, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London), Part B - Journal of Engineering Manufacture, (2001), 215, 583-588. ISSN 0954-4054.

*Поступила в редколлегию 15.06.2012*